

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Jembatan

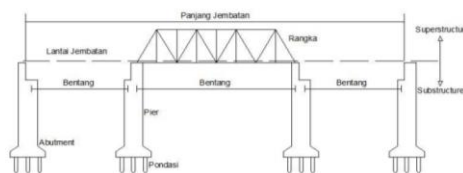
##### 2.1.1 Umum

Jembatan dapat diartikan sebagai bangunan jalan menyalang yang dimungkinkan mampu melewati saluran air, sungai, atau lembah maupun dapat jalan yang menyalang serta tidak mempunyai persamaan tinggi pada permukaannya. Dalam arti lain, Jembatan dapat diartikan pula sebagai struktur yang mempunyai konstruksi manfaat yaitu memberikan jalan yang terdapat halangan atau rintangan. Rintangan yang dimaksud adalah sungai, saluran drainase, daerah yang curam (jurang), rawa, danau, laut, ruas jalan tidak sebidang dan sebagainya. Pengertian yang lain dapat diartikan bahwa struktur ini mempunyai fungsi dalam pemberian pelayanan penggunaan kenyamanan saat berlalu lintas, perancangan serta perencanaan struktur ini lebih baiknya memperhatikan serta mempertimbangkan beberapa fungsi salah satunya persyaratan teknis, kebutuhan transportasi, dan lain sebagainya.

Dari penjabaran dan penjelasan diatas menyimpulkan bahwa jembatan merupakan bagian dari sistem yaitu dari transportasi yang terdiri dari tiga hal, yaitu (Bambang Supriadi, 2007) :

1. Mempunyai biaya tertinggi per mil dari sistem,
2. Jika jembatan runtuh, sistem akan lumpuh, dan
3. Merupakan pengontrol kapasitas dari system.

Berikut ialah komponen-komponen jembatan:



**Gambar 2.1** – Komponen – Komponen Jembatan

- Trotoar dapat diartikan sebagai bagian berfungsi untuk dapat digunakan sebagai jalur perlintasan bagi pejalan kaki.
- Lantai Trotoar merupakan lantai tepi dari plat jembatan yang berfungsi sebagai penahan beban-beban yang bekerja akibat beban trotoar, beban pejalan kaki, pipa sandaran, dan tiang sandaran.
- Tiang Sandaran mempunyai manfaat yaitu memberi kenyamanan dan aman serta keselamatan transportasi dan juga pengguna jalan yang menggunakan jembatan tersebut. Pipa pada tiang sandaran akan diletakkan pada tiang sandaran.
- Andas mempunyai fungsi yaitu mampu menahan beban berat horizontal dan vertikal, serta mempunyai fungsi meredam getaran yang diakibatkan beban-beban yang bekerja sehingga tidak terjadi kerusakan pada bagian *abutment*. Terletak pada bagian jembatan, bagian bangunan atas (*upper structure*) dalam suatu bagian yang disebut andas. Bantalan jembatan *elastomer* (*elastomeric bearing pads*) dapat digunakan dalam perletakan jembatan. Solusi yang dapat digunakan yaitu dengan menahan beban secara horizontal maupun vertikal dapat menggunakan “*Elastomeric bearing pads*” sebagai perletakan *elastomer* serta mampu meredam getaran sehingga kerusakan tidak dapat dialami pada bagian kepala jembatan.
- Lantai Kendaraan yaitu bagian tengah yang terdapat pada plat jembatan mempunyai fungsi sebagai jalur perlintasan kendaraan. Lebar jalur yang digunakan untuk kendaraan direncanakan memenuhi perlintasan dua buah kendaraan yang besar sehingga mampu membuat kendaraan yang melalui jembatan tersebut dapat dengan leluasa dan nyaman.
- Gelagar atau *Girder* adalah bagian balok yang diletakkan membentang baik dalam posisi melintang maupun memanjang mempunyai fungsi yaitu menyebarkan maupun menerima beban pada struktur yang akan diteruskan menuju ke bagian struktur bawah jembatan yaitu pondasi untuk disalurkan ke tanah keras pada dasar pondasi.
- Balok Memanjang adalah balok yang utama mempunyai fungsi memikul beban-beban yang terdapat pada lantai kendaraan maupun beban-beban lain

yaitu kendaraan yang melewati jembatan tersebut dan kemudian mendistribusikan beban tersebut kedalam pondasi untuk disalurkan menuju tanah keras pada dasar pondasi. Panjang bentang jembatan tersebut dapat mempengaruhi dimensi atau ukuran balok memanjang yang akan direncanakan.

- Balok Diafragma yaitu pengaku dari gelegar-gelegar memanjang tetapi tidak memikul beban di atasnya yaitu plat lantai dan direncanakan seperti balok biasa.
- Pelat Injak bagian dari struktur bawah pada jembatan mempunyai fungsi untuk penerima beban-beban yang bekerja di atasnya untuk selanjutnya akan disalurkan secara merata menuju tanah dibawahnya serta juga dapat mencegah terjadinya defleksi yang terjadi pada bagian permukaan jalan diakibatkan oleh beban-beban yang bekerja.
- *Abutment* mempunyai pengertian lain yaitu perletakan jembatan yang mempunyai fungsi sebagai pendukung struktur jembatan dan juga bagian yang akan menerima beban-beban dari gelagar kemudian akan diteruskan oleh pondasi untuk disalurkan ke tanah keras pada dasar pondasi.
- Pondasi bagian dari jembatan yang terletak didalam tanah. Pondasi mempunyai fungsi untuk menyalurkan beban-beban bangunan yang terjadi pada struktur di atasnya serta meneruskannya ke tanah dasar, baik ke arah horizontal maupun arah vertikal.
- Oprit Jembatan merupakan bagian bangunan yang terletak pada belakang *abutment* bertujuan sebagai penghubung antara jalan dengan bagian jembatan. Bagian bangunan yang terletak pada belakang *abutment* bertujuan sebagai penghubung antara jalan dengan bagian jembatan. Oprit juga dapat diartikan sebagai timbunan tanah yang terletak pada bagian belakang *abutment*.
- *Expansion Joint* telah mengalami kemajuan yang sangat pesat terutama di Indonesia. Pekerja lapangan sering mengalami kesulitan dalam hal pengerjaan siar muai dilapangan sebab jenis konstruksinya yang permanen. Pada kenyataannya tenaga yang diharapkan sulit untuk didapatkan.

Karenanya, terbitnya pedoman ini akan sangat membantu pelaksana maupun pengawas kegiatan untuk memasang siar muai secara baik sehingga kualitas jembatan secara keseluruhan dapat diperbaiki. Dalam hal ini memerlukan tenaga yang terampil dan juga berpengalaman. Pada kenyataannya tenaga yang diharapkan sulit untuk didapatkan. Karenanya, terbitnya pedoman ini akan sangat membantu pelaksana maupun pengawas kegiatan untuk memasang siar muai secara baik sehingga kualitas jembatan secara keseluruhan dapat diperbaiki.

### **2.1.2 Umur Rencana Jembatan**

Umur rencana jembatan untuk beberapa jenis jembatan diperkirakan mempunyai umur 50 tahun, kecuali:

- a. Untuk jembatan-jembatan sementara atau jembatan *demountable* dengan perkiraan umur yang direncanakan 20 tahun.
- b. Untuk jembatan-jembatan khusus yang ditentukan oleh pihak berwenang sebagai jembatan dengan spesifikasi luar biasa penting dalam aspek perekonomian atau jembatan yang strategis dengan umur yang akan direncanakan 100 tahun

Perkiraan umur rencana bukan dengan artian struktur tetap dipakai dalam waktu tertentu tanpa dipelihara secara teratur dan perlu diperiksa serta layak sehingga dapat dipakai lagi pada akhir umurnya.

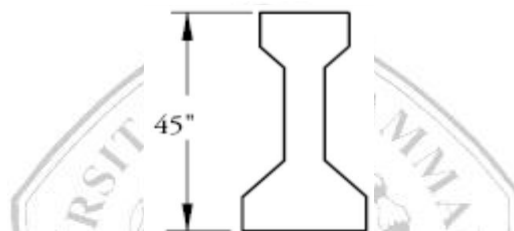
### **2.1.3 Jembatan Prategang**

Jembatan beton prategang mempunyai pengertian atau istilah lain yaitu *Prestressed Concrete Bridge* menggunakan bahan penyusun berupa beton dan baja atau lebih dikenal sebagai beton yang mempunyai kabel baja pada bagian dalam. Material yang digunakan dalam sistem ini merupakan sistem kabel dan material beton. Dalam material tersebut mempunyai fungsi dalam pemberian tegangan awal berupa tegangan tarik pada beton akibat karakteristiknya hanya menahan tekan tetapi tidak mampu menahan gaya tarik. Penjelasan diatas dapat memberikan solusi bahwa beton prategang mampu mengatasi besarnya

tegangan tarik yang diakibatkan pada struktur beton khususnya dalam suatu konstruksi dengan karakteristik dimensi panjang. Sistem kabel terdiri dari bagian kabel (*bar, strand, wire*), angkur dan selongsong (angkur mati dan angkur hidup). Macam-macam gelagar jembatan prategang, adalah:

#### 1. Penampang – I (I-Beams)

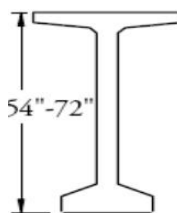
Penampang I adalah beton yang mengkonsentrasikan dalam memberikan gaya tekan dekat dengan serat terluar sehingga lebih efektif, ketika saat peralihan ataupun pada saat beban batas dan beban bekerja. Sesuai balok standar AASHTO-PCI, penampang I mempunyai tipe I-VI dengan bentang efektif dari 23 m – 46 m.



**Gambar 2.2** – Balok I AASHTO-PCI tipe III  
(Sumber: *Bridge design manual, 2011*)

#### 2. Penampang – T (T-Beams)

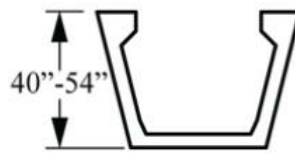
Penampang T mempunyai keuntungan ketika rasio beban mati terhadap beban hidup lebih besar, sebab tidak timbul masalah yang diakibatkan tegangan tekan yang besar terletak dibagian tepi bawah ketika transfer akibat gaya prategang. Sesuai balok standar AASHTO-PCI, penampang T mempunyai tipe BT-54, BT-63, BT-72 dengan bentang efektif dari 38 m – 47 m.



**Gambar 2.3** – Penampang T AASHTO-PCI tipe *bubl-tees*  
(Sumber: *Bridge design manual, 2011*)

### 3. Penampang Balok U (U-Beams)

Merupakan penampang yang banyak digunakan pada konstruksi jembatan *fly over* dan memiliki keistimewaan pada susunan tendonya yang berpasang-pasangan, sehingga pada saat penarikan bagian kabel *strand* harus digunakan dua dongkrak sekaligus pada girder. Sesuai balok standar AASHTO-PCI, penampang U mempunyai tipe U-40, 54, 66G5, 78G5 dengan bentang efektif dari 32 m – 41 m.

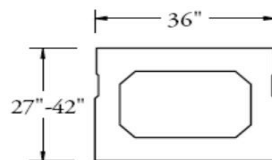


**Gambar 2.4** – Balok U AASHTO-PCI tipe 40

(Sumber: *Bridge design manual*, 2011)

### 4. Penampang balok kotak (box beams)

Penampang yang seringkali digunakan sebagai balok langsing dimana beban yang bekerja merupakan beban lateral sehingga diperlukan stabilitas terhadap beban lateral tersebut dan momen puntir. Penampang yang seringkali digunakan sebagai balok langsing dimana beban yang bekerja merupakan beban lateral sehingga diperlukan stabilitas terhadap beban lateral tersebut dan momen puntir. Berdasarkan Standar AASHTO-PCI, penampang balok kotak mempunyai 2 tipe yaitu tipe 36 dan 48 dengan nomor seri BI-BIV serta bentang efektif dari 24 m – 37 m.



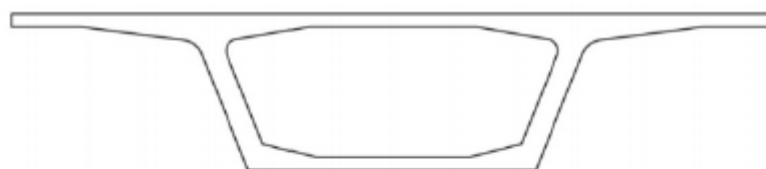
**Gambar 2.5** – Balok kotak AASHTO-PCI tipe 36

(Sumber: *Bridge design manual*, 2011)

## 2.2 Jembatan *Box girder*

*Box girder* merupakan jenis jembatan beton prategang yang mana struktur utamanya berupa balok-balok berbentuk kotak berongga. Jembatan *box girder*

mempunyai beberapa kombinasi yaitu dengan sistem *cable-stayed*, jembatan gantung, atau pelengkung. *Box girder* merupakan jenis jembatan beton prategang yang mana struktur utamanya berupa balok-balok berbentuk kotak berongga, mempunyai manfaat yaitu momen inersia relatif tinggi pada kombinasi berat sendiri tidak terlalu besar disebabkan adanya rongga yang ada pada tengah penampang. Tipe atau jenis penampang trapesium merupakan tipe *box girder* yang sering digunakan oleh beberapa bagian konstruksi serta penampang trapesium yang mempunyai profil rongga ditengah yang mempunyai kelebihan dapat didesain sesuai keinginan dari perencanaan dilapangan baik menggunakan satu atau banyak sel (*multi-cell*). Tipe atau jenis penampang trapesium merupakan tipe *box girder* yang sering digunakan oleh beberapa bagian konstruksi serta penampang trapesium yang mempunyai profil rongga ditengah yang mempunyai kelebihan dapat didesain sesuai keinginan dari perencanaan dilapangan baik menggunakan satu atau banyak sel (*multi-cell*). Gelagar *box girder* yang akan digunakan dan telah didesain dalam pembuatan biasanya akan dikerjakan langsung dipabrik (pabrikasi) guna memudahkan dalam mengontrol kualitas. Gelagar *box girder* yang akan digunakan dan telah didesain dalam pembuatan biasanya akan dikerjakan langsung dipabrik (pabrikasi) guna memudahkan dalam mengontrol kualitas.



**Gambar 2.6 – Penampang Box girder Satu Sel**

(Sumber : *Post-Tensioned Box girder Manual*)



**Gambar 2.7 – Penampang Box girder Multi Sel**

(Sumber : *Post-Tensioned Box girder Manual*)

### 2.2.1 Desain Perancangan Awal

Diambil dalam referensi perencanaan Jembatan dari Bambang Supriyadi, disebutkan bahwa dimensi *box girder* yang digunakan mempunyai batasan yaitu  $\frac{1}{15} < H/L < \frac{1}{3}$  serta nilai optimum yang dapat digunakan sebesar  $\frac{1}{18} - \frac{1}{20}$ . Namun, bagian-bagian yang belum ditentukan akan direncanakan menurut acuan dari penampang melintang gelagar oleh Podolny & Muller (1982), yaitu :

#### a. Tebal sayap atas

**Tabel 2.1 – Tebal Minimum Sayap Atas**

Bentang antar web	Tebal minimum sayap atas
Kurang dari 3 m	175 mm
Antara 3 m – 4,5 m	200 mm
Antara 4,5 m – 7,5 m	250 mm
Lebih dari 7,5 m	Digunakan sistem rib atau hollow slab

(Sumber : Jembatan, Bambang Supriyadi)

#### b. Tebal web

Tebal web minimum yang diambil sebagai berikut :

1. 200 mm, jika tidak terdapat tendon pada web
2. 250 mm, jika terdapat duct kecil baik vertikal maupun longitudinal pada web
3. 300 mm, jika digunakan tendon dengan strand 12,5 mm
4. 350 mm, jika tendon diangkurkan pada web

#### c. Tebal sayap bawah

1. 175 mm, jika duct tidak diletakkan pada sayap
2. 200 mm – 250 mm, jika duct diletakkan pada sayap
3. Tebal sayap bawah yang didesain yaitu setebal 250 mm.

## 2.3 Beton Prategang

### 2.3.1 Definisi

Dapat diartikan sebagai beton yang menghilangkan atau mengurangi tegangan tariknya hingga kondisi aman serta solusi pemberian gaya tekan permanen, dalam hal ini menggunakan baja prategang dengan tujuan menarik



sebelum beton mengalami pengerasan (pratarik) atau setelah mengalami pengerasan (pascatarik) (SNI 03-2847-2002). Definisi lain yaitu merupakan kondisi tegangan internal dengan nilai serta penyebaran yang direncanakan nantinya diharapkan mampu seimbang ke batas yang ditentukan diakibatkan oleh beban yang bekerja. Dalam penjelasan lainnya, dapat didefinisikan yaitu beton serta tulangan yang diberikan tegangan tekan dalam sehingga dapat mengurangi tegangan tarik potensial yang diakibatkan beban kerja (ACI).

### **2.3.2 Konsep Prategang**

#### **Konsep Dasar**

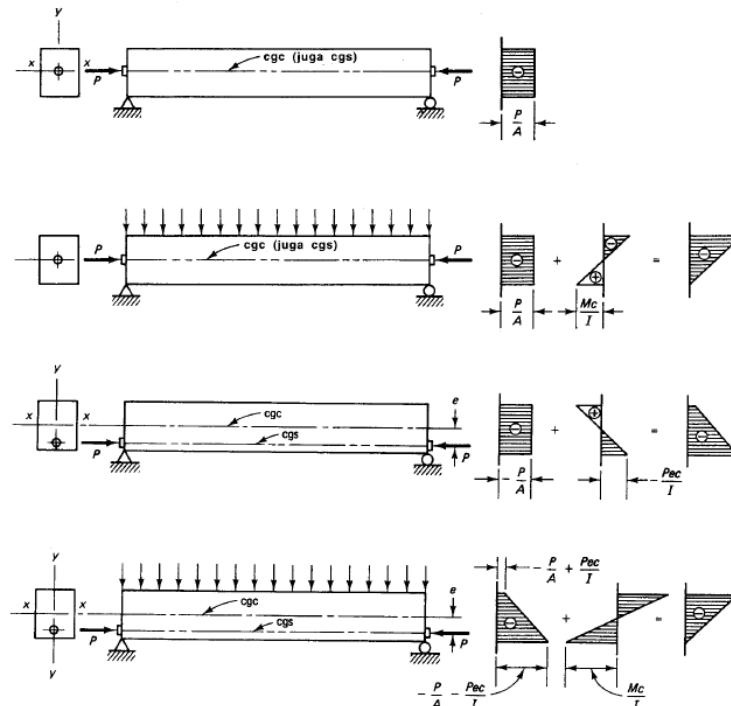
Konsep dasar pada prategang terlihat dari pembedanya yaitu antara beton prategang dengan beton tulangan, kondisinya beton tulangan menggunakan kombinasi tulangan baja dan beton caranya membiarkan dua elemen ini bekerja dengan karakteristiknya, tetapi pada beton prategang menggunakan kombinasi baja dan beton yang mempunyai kualitas tinggi dengan kondisi aktif. Diwujudkan menggunakan penarikan kabel baja serta ditahan di dalam beton, sehingga kondisinya menjadi tertekan. Dalam hal ini, penggabungan ini mampu menciptakan karakteristik baik terhadap material yang digabung. Baja merupakan material dengan mempunyai sifat yaitu aktif dalam kekuatan tarik tinggi dan liat. Beton merupakan material kaku serta karakteristiknya mampu memperbaiki gaya tariknya dengan diberikan gaya tekan, sehingga kemampuan material tersebut menahan gaya tekan tidak berkurang sehingga beton prategang adalah penggabungan material yaitu beton dan baja yang ideal dari bahan modern berkekuatan serta mempunyai mutu tinggi.

Pengertian lain, Beton prategang dapat diartikan sebagai beton yang dapat mengeliminir tegangan tarik diakibatkan beban luar sampai dengan kondisi batas tertentu dengan memberikan tegangan tekan internal sedemikian rupa. Terdapat tiga konsep mampu digunakan dalam menganalisa serta menjelaskan sifat dasar pada beton prategang atau prategang.

### Konsep Pertama :

*Sistem pratekan/prategang yang mampu mengubah material beton menjadi material elastis dari sifat awalnya yang getas.*

Eugene Freyssinet memberikan gambaran dengan meletakkan tekanan terlebih dahulu (pratekan) dimana material beton menjadi bahan berkarakteristik elastis yang pada dasarnya mempunyai karakteristik getas. Memberikan gaya tekan (penarikan baja dengan mutu tinggi), mempunyai sifat kuat serta getas serta mampu menahan tekan, dapat memikul tegangan tarik akibat beban eksternal dari adanya tekanan internal. Menggunakan gambar dibawah ini dapat menjelaskan penjabaran diatas sebagai berikut:



**Gambar 2.8** – Konsep Beton Konsentris dan Eksentris

(Sumber : Nawy, 2001)

Setelah gaya prategang diberikan maka tegangan tekan akan secara merata pada seluruh penampang beton sebaesar  $P/A$  setelah diberikan  $P$  yang bekerja dipusat berat penampang beton, pengertian  $A$  adalah luas penampang pada bagian beton tersebut. Tegangan tekan pada atas garis netral serta tegangan tarik pada bawah garis netral nilainya diertat luar

penampang akan terjadi akibat diberikan beban merata (termasuk berat sendiri beton) adalah:

$$\text{Tegangan} : f = \frac{M.c}{I} \quad \dots\dots\dots (\text{Sumber: Nawy, 2001})$$

Tegangan tekan yang terjadi pada penjabaran rumus diatas pada kondisi bagian atas setelah diberikan balok prategang digabungkan maka akan terjadi tegangan dari beban yang bekerja  $-Mc/I$ . Maka, nilai gaya prategang pada bagian tekan dapat menahan beban yang bekerja akan lebih berkurang akibat prategang yang diberikan, meletakkan tendon baja lebih tepat pada bawah garisnetral ditengah bentang sehingga menimbulkan tegangan tarik diserat atas akibat gaya prategang. Perletakkan tendon disebut garis cgc apabila diletakkan eksentrisitas "e" dari pusat beban beton maka momen  $P_e$ , serta gaya tegangan pada bagian bawah bentang yaitu :

$$f^t = -\frac{P}{A} + \frac{Pec}{I} - \frac{M.c}{I} \quad \dots\dots\dots (\text{Sumber: Nawy, 2001})$$

$$f_b = -\frac{P}{A} - \frac{Pec}{I} + \frac{M.c}{I} \quad \dots\dots\dots (\text{Sumber: Nawy, 2001})$$

dimana :

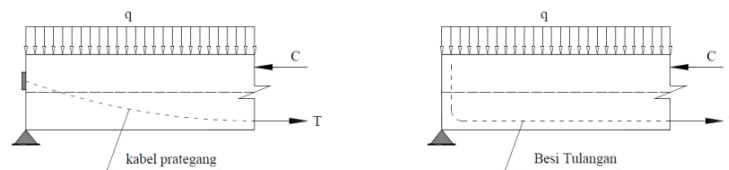
- $f$  : tegangan
- $f^t$  : tegangan di serat atas
- $f_b$  : tegangan di serat bawah
- $c$  : jarak garis netral ke serat terluar penampang
- $I$  : Momen inersia penampang
- $e$  : eksentrisitas

### **Konsep Kedua :**

*Sistem Prategang dengan Kombinasi Material Baja dan Beton dengan Kualitas atau Mutu Tinggi.*

Sistem ini sama dengan konsep beton tulangan atau sedikit menyerupai dengan pengertian beton prategang adalah gabungan bekerja sama dua material berbeda yaitu beton dan baja prategang yang mana baja prategang menahan beban tarik dan beton menahan beban tekan.

Menggunakan gambar dibawah ini dapat menjelaskan penjabaran diatas sebagai berikut:



**Gambar 2.9** – Penampang Beton Prategang dan Beton Bertulang

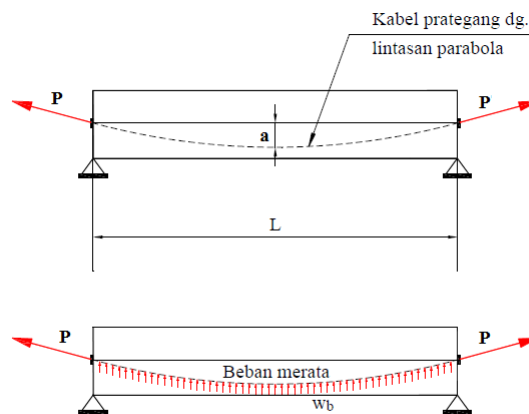
(Sumber : *Konstruksi Beton Preakan, Ir.Soetoyo*)

Kondisi beton prategang, gaya prategang  $T$  menarik baja prategang dimana gaya tersebut berbentuk kopel dengan momen gaya tekan dalam beton  $C$  sehingga mampu mengurangi momen yang diakibatkan beban eksternal. Sedangkan untuk beton tulangan pada umumnya, besi tulangan berfungsi untuk gaya pada tarik  $T$  yang diakibatkan oleh beban eksternal, serta membentuk kopel dengan momen gaya tekan dalam beton  $C$  bertujuan mengurangi momen eksternal diakibatkan beban eksternal.

### **Konsep Ketiga :**

*Sistem Prategang untuk Mencapai Keseimbangan Beban.*

Dalam hal ini yang digunakan adalah beton prategang menjadikan suatu bentuk gaya yang dapat membuat kesetimbangan gaya yang ada dalam struktur balok tersebut. Dalam desain beton prategang, yang mempengaruhi prategang dianggap menjadi kesetimbangan berat dalam struktur tersebut, menjadikan struktur mendapatkan lendutan layaknya balok, gelagar, dan plat tidak mendapatkan lentur dalam kondisi beban yang terjadi. Menggunakan gambar dibawah mampu menjelaskan penjabaran diatas sebagai berikut:



**Gambar 2.10** – Konsep Kesetimbangan Beban

(Sumber : *Konstruksi Beton Pratekan, Ir.Soetoyo*)

Suatu balok pada atas dua perletakan (*simple beam*) diberikan gaya prategang  $P$  melewati dalam kabel baja prategang menggunakan lintasan lengkung. Beban yang diakibatkan gaya prategan tersebar merata pada arah atas ditunjukkan:

$$W_b = \frac{8Pa}{L^2} \dots\dots\dots (\text{Sumber: Nawy, 2001})$$

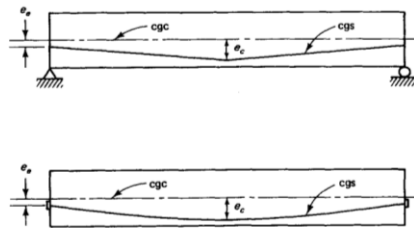
Dimana :

- $W_b$  : beban merata kearah atas, akibat gaya prategang  $P$
- $a$  : tinggi parabola lintasan kabel prategang
- $L$  : bentang balok
- $P$  : gaya prategang

### 2.3.3 Metode Beton Prategang

#### 1. Metode Konsep Dasar

Dalam merencanakan komposisi beton prategang, maka gaya tegang pada bagian serat akan secara langsung diperhitungkan dari gaya *eksternal* yang akan bekerja pada beton yang mengakibatkan pemberian prategang *longitudunal* dan beban *eksternal transversal*.

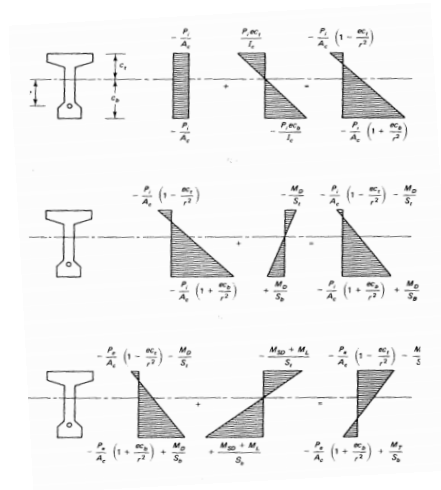


**Gambar 2.11** – Profil tendon prategang. (a) Tendon *harped*. (b) Tendon *draped*.

(Sumber: *Beton Prategang Nawy, 2001*)

## 2. Metode Garis C (Metode Elastis)

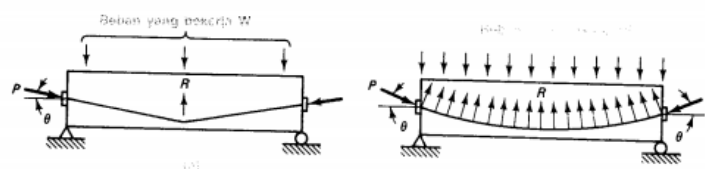
Di dalam konsep *thrust* atau *line-of-pressure*, balok dianalisa dengan menganggap seolah-olah berupa balok elastis dari beton polos dengan menggunakan prinsip-prinsip statika. Gaya prategang di pandang sebagai gaya tekan eksternal, dengan gaya tarik konstan  $T$  di tendon seluruh bentang. Dengan cara ini, efek beban gravitasi eksternal diabaikan. Gaya prategang dipandang sebagai gaya tekan eksternal, dengan gaya tarik konstan  $T$  ditendon seluruh bentang. Gaya prategang di pandang sebagai gaya tekan eksternal, dengan gaya tarik konstan  $T$  di tendon seluruh bentang. Dengan cara ini, efek beban gravitasi eksternal diabaikan. Gaya prategang dipandang sebagai gaya tekan eksternal, dengan gaya tarik konstan  $T$  ditendon seluruh bentang. Dengan cara ini, efek beban gravitasi eksternal diabaikan. Persamaan keseimbangan  $\Sigma H = 0$  dan  $\Sigma M = 0$  diterapkan untuk mempertahankan keseimbangan penampang. Gaya prategang dipandang sebagai gaya tekan eksternal, dengan gaya tarik konstan  $T$  di tendon seluruh bentang. Dengan cara ini, efek beban gravitasi eksternal diabaikan. Gaya prategang di pandang sebagai gaya tekan eksternal, dengan gaya tarik konstan  $T$  di tendon seluruh bentang.



**Gambar 2.12** – Tegangan serat elastis akibat bebrbagai pembebanan di balok prategang. (a) Prategang awal sebelum kehilangan. (b) Tambahan berat sendiri. (c) Beban kerja pada prategang efektif.  
(Sumber: *Beton Prategang Nawy, 2001*)

### 3. Metode Penyeimbangan Beban

Metode penyeimbangan beban ini didasari oleh penggunaan gaya horizontal daerah tendon prategang *harped* dan *draped* yang berfungsi untuk mengimbangi atau melawan beban gravitasi yang akan didapati pada balok prategang. Sehingga metode penyeimbang beban ini mampu digunakan ketika tendon prategang yang tidak lurus.



**Gambar 2.13** – Gaya-gaya penyeimbangan beban.  
(a) Tendon *harped*. (b) Tendon *draped*.  
(Sumber: *Beton Prategang Nawy, 2001*)

#### 2.3.4 Keuntungan Beton Prategang

Keuntungan dari Beton Prategang, yaitu:

1. Struktur pada beton prategang direncanakan mempunyai profil lebih relatif ramping.

2. Seluruh bagian penampang pada beton prategang akan lebih efektif, namun pada beton tulangan hanya berada pada atas garis netral yang relatif efektif.
3. Lendutan dihasilkan akan lebih relatif kecil.
4. Struktur pada beton prategang akan tidak menjadi retak diakibatkan beban-beban yang bekerja.
5. Material yang digunakan akan lebih relatif sedikit sebab penggunaan material mutu atau kualitas tinggi.
6. Daya pada ketahanan kondisi berkarat akan lebih relatif baik.

### **2.3.5 Material Beton Prategang**

#### **1. Beton Mutu Tinggi**

Struktur beton prategang, relatif banyak menggunakan material beton dengan spesifikasi mutu atau kualitas tinggi dimana dalam referensi ACI318 yaitu mempunyai karakteristik terhadap gaya tekan benda uji tabung 6000 Psi' (41,4 MPa). Tegangan tekan mampu ditahan oleh beton mutu tinggi sangatlah diperlukan dalam penarikan baja prategang untuk tidak mengalami kerusakan.

Dimana konstruksi beton prategang kebanyakan menggunakan beton dengan spesifikasi mutu atau kualitas tinggi yaitu kuat tekan atau  $f_c' = 30 \sim 40$  MPa, spesifikasi ini sangat diperlukan untuk mampu melawan gaya tekan dalam pengangkutan diharapkan tidak akan terjadi keretakan-keretakan. Pada kuat tarik di beton mempunyai nilai relatif jauh lebih relatif rendah dibandingkan kuat tekannya. Dalam SNI03-2874-2002 menentukan bahwa kuat tarik pada beton  $t_s' = 0,50 f_c'$  sedangkan ACI menetapkan  $\sigma_{ts}' = 0,60 f_c'$ . Dengan modulus elastisitas pada beton E dalam SNI03-2874-2002 ditentukan:



$$E_c = (w_c')^{1,5} \times 0,043 f_c'$$

Dimana:

$E_c$  : modulus elastisitas beton (MPa)

$w_c'$  : berat volume beton (kg/m<sup>3</sup>)

$f_c'$  : tegangan tekan beton (MPa)

Sedangkan untuk beton normal diambil:  $E_c = 4700 f_c'$  MPa

## 2. Baja Prategang

Baja prategang yang dipakai untuk mengatasi ketika terjadi susut beton dan kehilangan rangkai mengakibatkan prategang yang efektif serta efisien menggunakan kualitas atau mutu yang tinggi hampir mencapai 270.000 Psi atau lebih (1862 MPa' atau relatif lebih tinggi). Pada baja prategang yang menggunakan kualitas atau mutu yang tinggi mampu menyeimbangkan kehilangan pada beton dan sekitarnya serta memiliki rentan tegangan nilai sisa mampu menahan pada gaya prategang dibutuhkan terhadap beban-beban yang bekerja. Nilai kehilangan pada beton prategang normal mempunyai perkiraan batasan 35.000 sampai 60.000 Psi (241 sampai 414 MPa). Karakteristik fisik yang digunakan untuk baja dengan mutu tinggi sebagai berikut:

- Menggunakan baja dengan kuat tarik tinggi
- Modulus elastis rendah
- Batas elastis tinggi
- Relaksasi rendah
- Tahan korosi

Baja prategang dapat berbentuk kawat-kawat tunggal, strands yang terdiri atas beberapa kawat yang dipuntir membentuk elemen tunggal dan batang-batang bermutu tinggi.



(a) Strands (7-wires strand)

(Sumber : <http://www.uhengsteel.com>)

(b) Kawat tunggal

(Sumber : Nawy, 2001)

Tabel 2.2 – Tipikal Baja Prategang

Jenis material	Nominal diameter mm	Luas mm <sup>2</sup>	Gaya putus minimum kN	Tegangan tarik, $f_{pu}$ MPa
Kawat (wire)	3	7,1	13,5	1900
	4	12,6	22,1	1750
	5	19,6	31,4	1600
	7	38,5	57,8	1500
	8	50,3	70,4	1400
7 – wire strand super grade	9,3	54,7	102	1860
	12,7	100	184	1840
	15,2	143	250	1750
7 – wire strand regular grade	12,7	94,3	165	1750
Kawat batangan (Bar)	23	415	450	1080
	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080

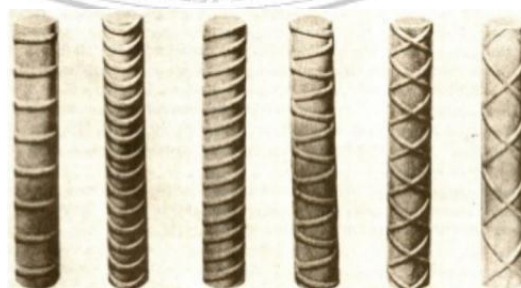
(Sumber : Nawy, 2001)

### 3. Baja Non Prategang

Penulangan baja untuk beton terdiri atas batang, kawat dan jalinan kawat yang dilas, yang semuanya dibuat sesuai dengan standar ASTM. Besaran yang paling penting pada baja tulangan adalah:

1. Modulus Young,  $E$
2. Kuat leleh,  $f$
3. Kuat ultimit,  $f$
4. Notasi mutu baja
5. Ukuran atau diameter batang atau kawat

Dalam peningkatan lekatan bagian antara baja dengan beton, proyeksi disebut deformasi di gilaskan pada daerah muka batang menyesuaikan dengan spesifikasi yaitu ASTM. Pada deformasi haruslah memenuhi dalam spesifikasi ASTM A616-76 sehingga batang mampu disebut sebagai *deformed*. Bagian kawat *deformed* atau berulir memiliki karakteristik diberikan gaya tekan kedalam batang atau kawat sehingga mampu menjadi deformasi. Perlu diperhatikan pengecualian terhadap kawat yang akan digunakan dalam penulangan kolom, kawat berulir, hanya jalinan kawat, atau batang berulir terdiri dari kawat yang polos maupun ulir saja mampu dipakai dalam beton bertulang pada prakteknya dilapangan.



**Gambar 2.14** – Macam-macam Batang Terdeformasi (*Deformed*) Sesuai ASTM

(Sumber: Nawy, 2001)

### 4. Selongsong Tendon (Duct)

Selongsong atau pipa tendon adalah bagian untuk menempatkan kabel baja terbentuk dari bagian membran tipis serta tidak bergerak pada

tempat yang telah drenanakan. Bahan dari pipa tersebut haruslah memungkinkan lewatnya pasta semen masuk kedalam dan juga mampu menyalurkan tegangan pada lekatan yang digunakan dan mampu mempertahankan profilnya. Berdasarkan SNI T-12-2004, selongsong untuk sistem pascatarik haruslah tahan dengan mortar dan tanpa bereaksi terhadap beton, baja prategang, atau material grouting. Selongsong untuk sistem pascatarik haruslah tahan dengan mortar dan tanpa bereaksi terhadap beton, baja prategang, atau material grouting. Bahan dari pipa tersebut haruslah memungkinkan lewatnya pasta semen masuk kedalam dan juga mampu menyalurkan tegangan pada lekatan yang digunakan dan mampu mempertahankan profilnya. Diameter selongsong yang nantinya akan dilakukan pengisian setidaknya haruslah lebih besar 6 mm' dari diameter tendon dan memiliki luasan penampang dalam minimum 2 kali luas tendon.

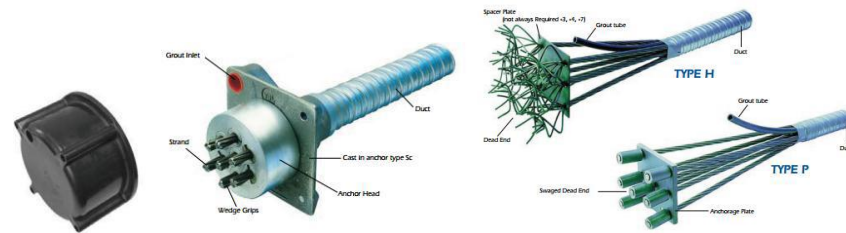


**Gambar 2.15** – Selongsong Tendon (Duct)

(Sumber : Brosur VSL Multistrand Post-Tensioning)

## 5. Angkur

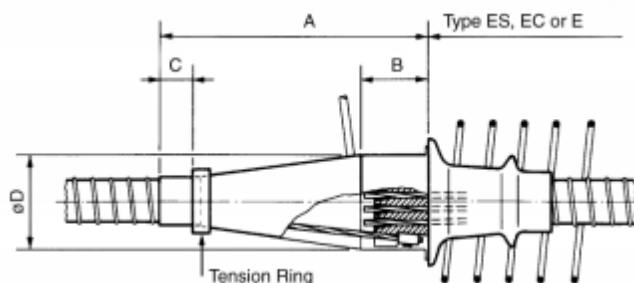
Penjangkaran serta penarikan kabel baja dibagian ujung serta tendon ditempatkan dalam bagian angkur. Angker dalam sistem beton prategang terdapat dua jenis yakni angkur mati dan hidup yang mana angkur tersebut harus diproduksi oleh pabrikator yang terjamin dalam segi mutu yang sesuai dengan spesifikasi teknik.



**Gambar 2.16** – Angkur Mati dan Angkur Hidup  
(Sumber : Brosur VSL Multistrand Post-Tensioning)

## 6. Penyambung (Coupler)

Sistem pada penyambung dalam kabel baja (coupler) haruslah diletakkan didaerah yang telah direncanakan oleh pihak yang merencanakan sehingga mampu mentransfer gaya lebih relatif besar dari gaya kuat tarik material akan disambungkan.



**Gambar 2.17** – Penyambung Multistrand  
(Sumber : Brosur VSL Multistrand System)

## 7. Kawat Baja

Bagian ini dipabrikasi dengan bentuk layaknya gulungan atau kawat dipotong dalam kondisi panjang yang ditentukan serta dirakit pada lapangan atau pabrik. Baja yang digunakan haruslah terbebas dari bahan pengganggu seperti lemak untuk menjamin lekatan antara baja prategang dengan beton.

## 8. Untaian Kawat (Strand)

Strand atau untaian kawat mempunyai kapasitas dengan batas nilai strand terdiri dari dua jenis yaitu 1720 MPa atau 1860 MPa, sering digunakan atau lazim digunakan ialah untaian dengan tujuh kawat.

## 9. Batang Baja

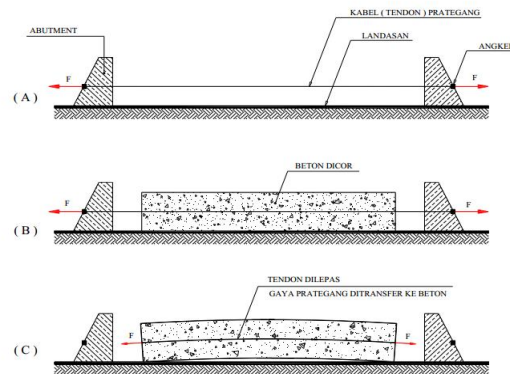
Bagian ini sering dipakai dengan beton pada prategang dispesifikasikan dalam ASTM-A322, mempunyai kapasitas dengan batas minimum yaitu 1000 MPa. Pada modulus elastisitas mempunyai batasan  $1,72.105' - 1,93.105'$  MPa. Bagian batang dengan baja kualitas atau mutu tinggi tersedia dalam panjang kurang lebih 24 m. Bagian batang dengan mutu tinggi tersedia sampai  $\varnothing 34,9 \text{ mm}'$ . Baja prategang dipakai diharapkan mampu mengantisipasi dalaam kehilangan susut beton dan rangkak sehingga prategang dapat menjadi lebih efektif dengan menggunakan material mutu yang sangat tinggi.

### 2.3.6 Metode Penegangan

Metode Penegangan terdapat 2 jenis metode yang dapat digunakan dalam pemberian gaya prategang pada beton prategang, sebagai berikut:

#### 1. Pemberian Pratarik (Pre-tension)

Dalam metode penegangan sistem *pretension*, beton akan dicor dahulu kemudian tendon ditarik. Gaya prategang melewati pada beton prategang pada bagian lekatan ketika setelah beton cukup keras dan dilanjutkan pemotongan tendon. Metode pemberian pratarik sangatlah tepat untuk pembuatan banyak. Pengecoran beton di sekitarnya dilakukan terlebih dahulu kemudian dilanjutkan dengan baja prategang diberikan *pretension* terhadap pengangkeran independen. Pemberian *pretension* dalam baja prategang disebut pratarik bukan dalam baloknya. Pada lokasi pabrikasi produksi pracetak biasanya akan dilakukan pemberian *pretension*. Berikut merupakan prinsip dari *pretension* secara penjelasan singkat adalah sebagai berikut:



**Gambar 2.18 – Prinsip Pra-tarik**

(Sumber: *Konstruksi Beton Pratekan, Ir.Soetoyo*)

### Bagian 1

Kabel Baja pada balok prategang akan diberi gaya prategang atau ditarik kemudian pada *abutment* tetap akan dilakukan pengangkeran (gambar 2.18 A).

### Bagian 2

Material beton selanjutnya dicor dalam cetakan serta pada landasan telah disediakan dengan benar sehingga nantinya akan melingkupi tendon telah diberi gaya prategang selanjutnya akan mengering (gambar 2.18 B).

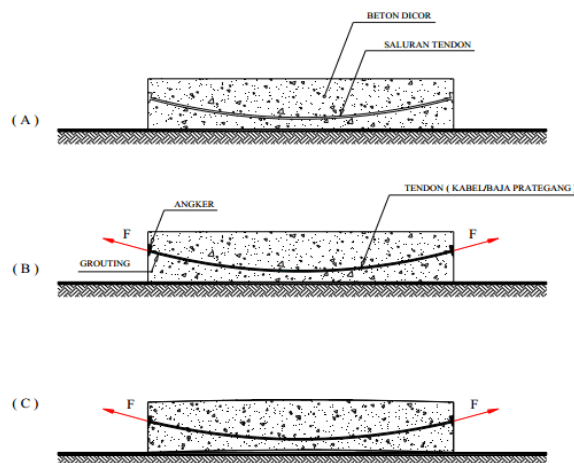
### Bagian 3

Setelah beton akan mengering serta cukup dari segi umur serta kuat mampu menerima gaya prategang, tendon selanjutnya akan dipotong dan dilepas, sehingga gaya prategang akan ditransfer ke beton (gambar 2.18 C).

Setelah beton diberikan gaya prategang, sebelum menerima beban kerja balok tersebut akan melengkung keatas. Balok akan kembali rata setelah menerima beban yang bekerja.

## 2. Pemberian Pascatarik (Post-tension)

Beton akan dicor terlebih dahulu kemudian tendon akan ditarik ini merupakan prinsip dari metode pascatarik. Pada metode ini, selongsong untuk alur dari tendon akan dipasang terlebih dahulu sebelum pengecoran dilakukan. Beton akan dicor terlebih dahulu kemudian tendon akan ditarik ini merupakan prinsip dari metode pascatarik. Pada metode ini, selongsong untuk alur dari tendon akan dipasang terlebih dahulu sebelum pengecoran dilakukan. Kemudian ketika beton telah selesai pengecoran, dilanjutkan dengan memasukkan tendon ke dalam beton yang sebelumnya sudah dipasang ketika pengecoran pada bagian selubung tendon. Setelah mencapai dalam kekuatan direncanakan maka akan dilanjutkan pada penarikan tendon sesuai dengan perhitungan. Selongsong dapat diisi dengan bahan grouting apabila telah melakukan penarikan.



**Gambar 2.19** – Prinsip Pasca-tarik

(Sumber: *Konstruksi Beton Pratekan, Ir.Soetoyo*)

### Bagian 1

Pada bagian cetakan telah dilengkapi bagian saluran kabel baja prategang dengan posisi melengkung yang telah direncanakan sesuai dengan bidang dalam momen kemudian dilanjutkan dengan pengecoran beton. (gambar 2.19 A).



### Tahap 2

Kabel prategang atau tendon dimasukkan ke dalam selongsong (tendon duct) ketika beton dirasa cukup umur serta kuat menahan gaya prategang sesuai dengan perhitungan dan kondisi perencanaan. Selanjutnya dilakukan penarikan sehingga akan mendapatkan gaya prategang sesuai dengan perencanaan. Pada metode ini cara memberikan gaya prategang yaitu ujung dapat dilakukan penarikan (ditarik dari satu sisi) setelah salah satu ujung kabel diangker. Ada pula melakukan penarikan secara bersama-sama pada kedua sisinya serta kemudian ditarik secara bersamaan. Kemudian saluran digrouting melewati lubang yang sudah dibuat setelah pengangkuran. (gambar 2.19 B).

### Tahap 3

Selanjutnya balok akan menjadi tekan setelah dilakukan pengangkuran sehingga gaya prategang akan ditransfer ke beton. Gaya prategang pada tendon mampu memberikan beban yang merata pada balok yang arahnya ke atas karena tendon dipasang parabola sehingga balok melengkung ke atas (Gambar 2.19 C).

## 2.3.7 Tahap Pembebanan

Pada beton prategang bukan seperti beton bertulang, beton prategang memiliki 2 tahap bagian pembebanan. Pengecekan wajib selalu dilakukan dalam situasi yang terjadi dalam bagian tertekan ataupun bagian tertarik pada setiap penampang ketika tahap dalam pembebanan. Tahap transfer dan tahap service merupakan dua tahap pembebanan dalam beton prategang berikut penjelasannya:

### 1. Tahap Transfer

Pada metode pratarik, saat gaya prategang ditransfer ke beton dan angker dilepas maka hal ini akan menjadi tahap transfer. Pada metode pascatarik, saat melakukan penarikan kabel prategang dan beton sudah cukup umur maka hal ini akan menjadi tahap transfer. Ketika tahap transfer terjadi maka beban dipakai hanya beban pekerja, berat struktur

sendiri, dan peralatan, sedangkan beban hidup belum dapat diperhitungkan sebab belum bekerja sepenuhnya, sehingga gaya prategang bekerja yaitu maksimum sebab belum terjadi kehilangan yang begitu berarti, sementara gaya prategang beban yang bekerja sangat minimum.

## 2. Tahap Service

Tahap service merupakan tahap yang mulai masuk setelah beton prategang difungsikan sebagai komponen struktur atau beton prategang digunakan, atau dapat disebut pula tahap layan dari beton prategang tersebut. Pada bagian ini semua kehilangan pada gaya prategang wajib diperhitungkan pada analisa strukturnya karena beban eksternal seperti beban angin, hidup, gempa, dan lainnya mulai bekerja. Analisis terhadap daya layan, kekuatan, lendutan terhadap lendutan ijin harga retak pada nilai batas diijinkan harus selalu dilakukan pada setiap tahap pembebanan pada beton prategang karena beban yang bekerja sudah perlu dipertimbangkan. Pada perhitungan dalam tegangan dapat digunakan dengan konsep kopel internal, pendekatan kombinasi pembebanan, dan metode beban penyeimbang.

### 2.3.8 Kehilangan Prategang

Kehilangan prategang dapat didefinisikan sebagai tahapan pada komposisi beton yang mengalami kondisi proses yang reduksi progresif kurang lebih selama waktu 5 tahun dengan kondisi akan terjadi pengurangan gaya prategang awal yang diberikan atau direncanakan. Secara garis umum kehilangan pada prategang dapat dijabarkan sebagai berikut :

#### a. Kehilangan elastis segera (Immediate elastic losses)

Kehilangan elastis segera merupakan kehilangan pada gaya prategang segera atau langsung setelah bagian beton diberikan gaya prategang. Maka kehilangan gaya prategang segera dapat disebabkan beberapa hal yaitu:

- Terjadi pada beton prategang dengan metode *postension* yaitu kehilangan yang disebabkan akibat friksi atau gesekan pada sepanjang garis kelengkungan dalam tendon.

- Perpendekan elastis beton prategang.
- Akibat slip diangkur masuk dalam kehilangan pada sistem angkur.

**b. Kehilangan bergantung waktu (Time dependent losses)**

Kehilangan pada gaya prategang yang diakibatkan pada pengaruh waktu dapat disebabkan oleh beberapa hal yaitu:

- Beton Prategang terjadi susut.
- Rangkak (creep)
- Baja mengalami relaksasi.

Berikut merupakan jenis-jenis kehilangan pada gaya prategang terjadi dalam bagian tendon yaitu:

**1) Kehilangan gaya prategang akibat perpendekan elastis beton**

Tendon akan terjadi kehilangan sebagian pada gaya prategang yang dilawannya akibat dari tendon melekat pada sekitar beton dengan kondisi simultan memendek karena akan memendek ketika gaya prategang aktif. Dampak akibat dari kehilangan pada gaya prategang akibat perpendekan elastis beton berbeda antara sistem pratarik dan pascatarik.

- Sistem pascatarik

Dalam metode *postension* (pascatarik) gaya prategang diukur setelah perpendekan elastis beton terjadi tetapi hanya dalam penggunaan kabel tunggal tidak terjadi kehilangan pada prategang yang diakibatkan perpendekan pada elastis beton prategang. Kehilangan pada gaya prategang ditentukan pada kabel pertama ditarik dan menggunakan nilai setengahnya dalam mendapatkan nilai rata-rata pada semua kondisi kabel. Jika kabel menggunakan lebih dari satu kabel. Maka kehilangan pada gaya prategang dalam metode *postension* ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$- \Delta f_{pES} = 0,5 \times \Delta f_{pES} \quad \text{.....(Sumber: Nawy, 2001)}$$

- Sistem pratarik

Pada sistem pratarik perubahan regangan pada baja prategang yaitu sama dengan kondisi regangan beton dalam baja prategang yang diakibatkan oleh perpendekan elastis beton. Kehilangan pada gaya tegangan akibat dari

perpendekan elastis tegangan beton dimana baja prategang terletak dan bergantung dalam rasio antara modulus elastisitas beton serta dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\Delta f_{pES} = n f_{cs} \quad \text{.....(Sumber: Nawy, 2001)}$$

dimana :

$$n = \frac{E_s}{E_{cl}}$$

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c} \left( 1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_D e_b}{I_c}$$

## 2) Kehilangan gaya prategang akibat friksi (F)

Pada struktur dalam beton prategang pada bagian tendon dipasang dengan posisi parabola maka tegangan pada tendon ataupun kabel baja akan lebih relatif kecil daripada bacaan dalam alat baca tegangan disebabkan adanya gesekan antara sistem penarik (jacking) dengan ankur pada beton di sekelilingnya. Kehilangan pada gaya prategang akibat gesekan bagian tendon akan dipengaruhi oleh beberapa hal berikut yaitu:

- Penggunaan koefisien wobble K karena pergerakan pada selongsong kabel baja prategang,
- Penggunaan koefisien geseran  $\mu$  karena kelengkungan kabel baja prategang.

Alinyemen kelengkungan tendon yang akan dipengaruhi merupakan akibat dari efek kelengkungan itu sendiri, sedangkan kesalahan alinyemen tak disengaja atau tidak dapat dihindari merupakan efek wobble itu sendiri, karena peletakan saluran tidak dapat secara sempurna.

$$\Delta f_{pF} = f_i (\mu \alpha + KL) \quad \text{.....(Sumber: Nawy, 2001)}$$

Dimana :

$$\alpha = \frac{8y}{x}$$

- Nilai K dan L terdapat pada tabel

Tabel 2.3 – Koefisien Kelengkungan dan Wobble

Jenis tendon	Koefisien wobble, K per foot	Koefisien kelengkungan, $\mu$
<b>Tendon yang diselubungi metal fleksibel</b>		
Tendon kawat	0,0010-0,0015	0,15-0,25
Strand 7 kawat	0,0005-0,0020	0,15-0,25
Batang mutu tinggi	0,0001-0,0006	0,08-0,30
<b>Tendon disalurkan metal yang rigid</b>		
Strand 7 kawat	0,0002	0,15-0,25
<b>Tendon yang dilapisi mastic</b>		
Tendon kawat dan strand 7 kawat	0,0010-0,0020	0,05-0,15
<b>Tendon yang dilumasi dahulu</b>		
Tendon kawat dan strand 7 kawat	0,0003-0,0020	0,05-0,15

(Sumber: Navy, 2001)

### 3) Kehilangan gaya prategang akibat dudukan angker (A)

Kehilangan yang terjadi akibat dudukan angker dalam elemen struktur pratarik saat gaya prategang ditransfer ke landasan akibat dilakukannya penyesuaian, sedangkan pada komponen struktur pascatarik ketika gaya pendongkrak dialirkan menuju angker maka kehilangan juga akan terjadi dalam landasan cetakan pada prategang diakibatkan adanya blok-blok pada angker pada.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} \times E_{ps} \quad \text{.....(Sumber: Navy, 2001)}$$

Dimana :

- $\Delta_A$  = besar gelincir
- $L$  = panjang tendon
- $E_{ps}$  = modulus kawat prategang

### 4) Kehilangan gaya prategang akibat rangkak (CR)

Creep (rangkak) adalah akibat adanya tegangan longitudinal atau beban yang terjadi pada sepanjang waktu sehingga terjadi aliran lateral atau deformasi di material. Regangan rangkak adalah tambahan yang terjadi akibat beban dengan nilai sama dan terus menerus bekerja sedangkan regangan elastis adalah deformasi awal akibat beban.

$$\Delta f_{PCR} = n K_{CR} (f_{cs} - f_{csd}) \quad \dots\dots\dots (\text{Sumber: Nawy, 2001})$$

Dimana :

- $K_{CR}$  = 2,0 untuk struktur pratarik  
= 1,60 untuk struktur pasca tarik
- $f_{cs}$  = tegangan di beton pada level pusat berat baja segera setelah transfer
- $f_{csd}$  = tegangan di beton pada level pusat berat baja akibat semua beban mati tambahan yang bekerja setelah prategang diberikan
- $n$  = rasio modulus

### 5) Kehilangan gaya prategang akibat susut (SH)

Sama halnya pada rangkai, terdapat beberapa faktor mempengaruhi besarnya susut beton. Faktor-faktor yang mempengaruhi tersebut antara lain meliputi jenis semen, jenis agregat, proporsi campuran, waktu antara pada akhir perawatan eksternal, waktu perawatan serta pemberian prategang, kondisi lingkungan dan ukuran pada komponen struktur prategang. Dalam elemen pascatarik, terdapat kehilangan pada prategang yang diakibatkan oleh susut sedikit lebih relatif kecil disebabkan sebelum pemberian pascatarik sebagian susut telah terjadi.

$$\Delta f_{PSH} = 8,2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{ps} \left(1 - 0,06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) \quad \dots (\text{Sumber: Nawy, 2001})$$

Dimana :

- RH = kelembapan relatif
- V/S = rasio volume per permukaan
- Nilai  $K_{SH}$  = 1,0 (komponen struktur pratarik)

Tabel 2.4 – Nilai  $K_{SH}$  Komponen Pascatarik

Waktu Dari Akhir Perawatan Basah Hingga Pemberian Prategang (Hari)	1	3	5	7	10	20	30	60
$K_{SH}$	0,92	0,85	0,80	0,77	0,73	0,63	0,58	0,45

( Sumber: Nawy, 2001)

### 6) Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja (RE)

Akibat dalam perpanjangan konstan dengan waktu maka tendon *stress-relieved* akan mengalami proses kehilangan pada gaya prategang. Nilai

pengurangan prategang tidak hanya bergantung pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang ( $\frac{f_{pi}}{f_{py}}$ ) melainkan juga durasi gaya prategang yang ditahan. Persamaan kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja yaitu :

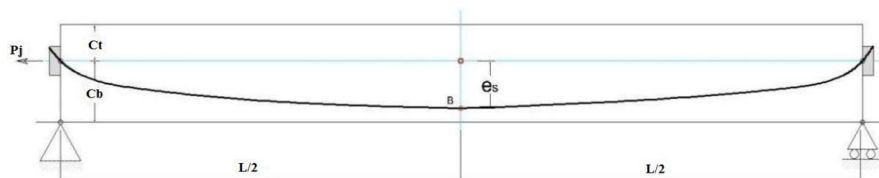
$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left( \frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left( \frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \dots\dots\dots (\text{Sumber: Nawy, 2001})$$

Dimana :

- $f_{pi}$  = tegangan awal di baja yang dialami elemen beton
- $f_{py}$  = kuat leleh baja prategang, yang dapat dihitung dari
  - =  $0,80 f_{pu}$  (batang prategang)
  - =  $0,85 f_{pu}$  (tendon *stress-relieved*)
  - =  $0,90 f_{pu}$  (tendon relaksasi rendah)
- $t_1$  = waktu pada awal suatu interval dihitung dari saat pendongkaran
- $t_2$  = waktu akhir di interval dihitung dari saat pendongkaran

## 2.4 Lintasan (Layout) Tendon

Lintasan tendon mempunyai pengertian yaitu sepanjang daerah jembatan dengan kondisi titik berat pada kabel-kabel prategang (center gravity of steel / CGS) membentuk lintasan lurus serta melintasi lintasan dengan cara lintasan kabelnya naik dengan secara per lahan-lahan pada tengah bentang yang akan membentuk melengkung (*draped*) dan menaikkan pada kabel prategang secara mendadak pada tengah bentang. Lintasan tendon lengkung dapat ditentukan dengan melalui titik-titik pada kordinat persamaan parabolik, yaitu :



**Gambar 2.20** – Layout Tendon Parabolik

(Sumber : Perhitungan Box girder Beton Prestress, Ir.Soetoyo)

$$Y_i = \frac{4 f X_i (L - X_i)}{L^2} \quad \text{.....(Sumber: Ilham, 2001)}$$

Dimana :

$Y_i$  = Ordinat tendon yang ditinjau

$X_i$  = Absis tendon yang ditinjau

$L$  = Panjang bentang

$f = e_s$  = tinggi parabola maksimum

## 2.5 Daerah Aman Kabel

Eksentrisitas tendon dibatasi dalam balok sederhana dapat menggunakan daerah aman tendon prategang atau kabel digunakan. Perlu menetapkan batasan untuk melihat apakah tarik minimum pada selubung atas serta bawah terhadap kern atas serta bawah dan diperkenankan dalam desain untuk membatasi ordinat maksimum.

Jika MT adalah momen total dan MD adalah momen akibat beban mati akibat semua beban transversal sehingga lengan pada kopel terletak antara garis tekan pusat (garis C) dengan pusat garis tendon prategang (garis cgs) yang diakibatkan MD dan MT masing-masing adalah  $a_{min}$  dan  $a_{max}$ .

**Selubung lengan cgs bawah.** Lengan minimum dari kopel tendon adalah

$$a_{min} = \frac{M_D}{P_i} \quad \text{.....( Sumber: Nawy, 2001)}$$

Dimana  $P_i$  adalah gaya prategang awal

Persamaan ini mendefinisikan jarak maksimum di bawah kern bawah di mana garis cgs ditentukan sedemikian hingga garis C tidak terletak di bawah garis kern bawah, sehingga mencegah terjadinya tegangan tarik di serat ekstrim atas. Dengan demikian, eksentrisitas bawah yang membatasi adalah

$$e_o = (a_{min} + k_b) \quad \text{.....( Sumber: Nawy, 2001)}$$

$$\text{Dimana } k_b = \frac{r^2}{c_t}$$

- $r^2$  adalah kuadrat jari-jari girasi
- $c_t$  adalah jarak titik pusat balok terhadap garis terluar balok sebelah atas



Selubung lengan cgs atas. Lengan minimum dari kopel tendon adalah

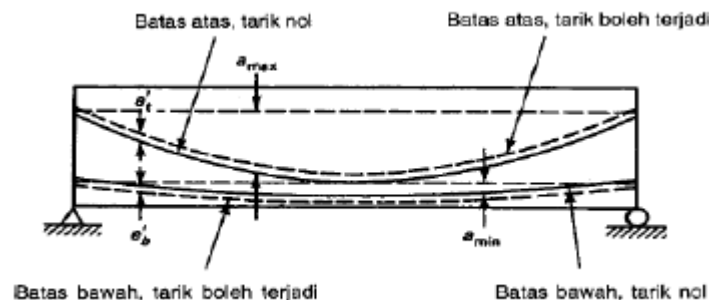
$$a_{\max} = \frac{M_T}{P_e} \dots\dots\dots ( \text{Sumber: Nawy, 2001} )$$

Persamaan tersebut mendefinisikan jarak minimum di bawah kern atas di mana garis cgs ditentukan sedemikian hingga garis C tidak terletak di atas garis kern atas, sehingga mencegah terjadinya tegangan tarik di serat ekstrim bawah.

Dengan demikian, eksentrisitas atas yang membatasi adalah

$$\text{Dimana } k_t = \frac{r^2}{c_b}$$

- $r^2$  adalah kuadrat jari-jari girasi
- $c_b$  adalah jarak titik pusat balok terhadap garis terluar balok sebelah bawah



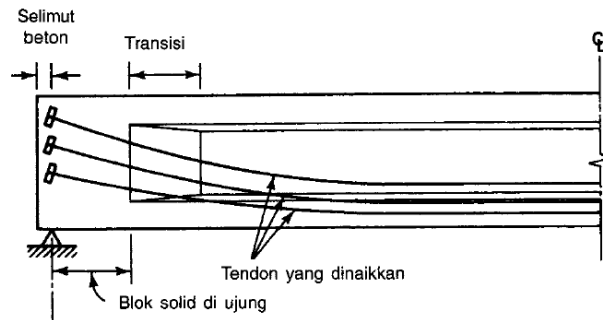
Gambar 2.21 – Daerah Aman Kabel

(Sumber: Nawy, 2001)

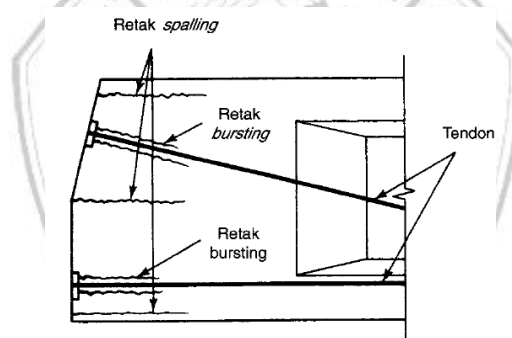
## 2.6 Balok Ujung (End Block)

Pada muka ujung balok segmen kecil di penampang tumpuan dalam arah longitudinal terjadi pemusatan tegangan tekan yang besar, pada balok pasca ataupun tarik dalam balok pratarik, terjadi akibat dari gaya prategang yang relatif besar. Pada bagian dari muka penampang tumpuan sampai pada dasarnya di seluruh panjang  $l_t$  ( $l_t = \frac{1}{1000} (\frac{f_{ps}}{3}) d_b$ ) terjadi transferan beban terpusat pada gaya prategang menuju beton disekitarnya dengan graduaal akan menjadi seragam. Balok pascatarik, tidak mungkin terjadi transfer serta penyebaran beban secara graduaal sebab pada muka daerah ujung balok melewati plat tumpuan serta anker gayanya bekerja langsung. Menciptakan kondisi lebar badan pada tumpuan hampir sama dengan lebar sayap salah satu cara mengakomodasi bagian tendon yang dilakukan

peninggian, dilokasi yang semakin mendekati tumpuan jarang terjadi luas penampang untuk diperbesar dengan graduaal. Namun pada peningkatan luas penampang tidak terjadi kontribusi mencegah terjadinya retak *bursting*, *spalling*, atau pada beton tidak berpengaruh terhadap pengurangan tarik transversaal. Berikut ilustrasi gambar untuk zona angker tendon terlekat :



**Gambar 2.22** – Transisi Daerah Solid ke Tumpuan  
(Sumber: Nawy, 2001)



**Gambar 2.23** – Zona Ujung, Retak *Bursting* dan Retak *Spalling*  
(Sumber: Nawy, 2001)

Jadi, sangat dibutuhkan memperkuat dalam bagian pengangkeran sangat diperlukan pada daerah bagian transfer beban guna mencegah retak *spalling* dan retak *bursting* yang menutupi area semua prategang utama serta penulangan daerah longitudinal non-prategang dalam bentuk sengkang, alat-alat penjangkaran, atau tulangan tertutup. Menurut Guyon, Persamaan direkomendasikan dalam menghitung gaya tarikan memecah (*bursting*) yaitu :

$$F_{bst} = 0,3 \times P_j \times [(1 - (y_{po}/y_o))^{0,58}] \quad \text{..... ( Sumber: Raju, 1993)}$$

Dimana :

- $P_j$  = Gaya *jacking* diangkur
- $y_{po}/y_o$  = Perbandingan Dsistribusi
- $2y_{po}$  = Tinggi pelat angkur
- $2y_o$  = Tinggi prisma ekuivalen

Ada beberapa faktor untuk menentukan tegangan bantalan izin tergantung pada, seperti perbandingan pada luas bantalan dengan luas bagian total, dengan metode perhitungan tegangan, dan luas tulangan pada angkur. Berikut persamaan untuk menghitung tegangan tumpuan rata-rata dibeton.

Pada beban peralihan (*transfer*) :

$$\sigma_{bi} = 0,8 f'_{ci} \sqrt{\left(\frac{A_2}{A_1} - 0,2\right)} \leq 1,25 f'_{ci} \quad \text{.....(Sumber: Lin, 1993)}$$

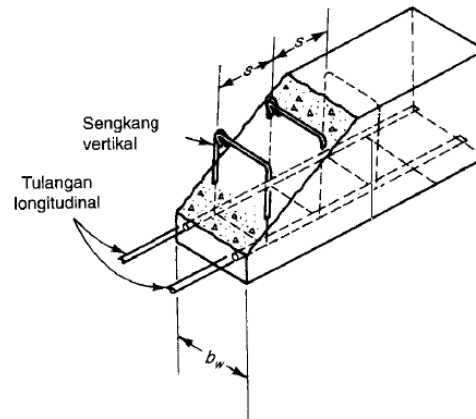
pada beban kerja (*service*) :

$$\sigma_b = 0,6 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f'_c \quad \text{.....(Sumber: Lin, 1993)}$$

## 2.7 Tulangan Geser

Mencegah retak diagonal dalam bagian struktur pada prategang merupakan fungsi dari tulangan geser. Dasarnya pada penulangan geser menggunakan empat fungsi sebagai berikut :

1. Penulangan mampu menahan kondisi pada posisi batang tulangan utama longitudinal sehingga mampu melakukan pengekangan beton pada daerah tekan, jika sengkang digunakan merupakan sengkang tertutup.
2. Penulangan memikul sebagian nilai gaya geser ter faktor eksternal yaitu  $V_u$ .
3. Penulangan membatasi terjadinya perambatan pada retak diagonal.



**Gambar 2.24** – Sengkang Vertikal

(Sumber: Nawy, 2001)

Kekuatan geser pada batas beton ( $V_c$ ) yaitu tahanan pada geser nominal beton yang polos pada bagian badan serta dapat diperhitungkan dengan kondisi retak geser bagian badan ( $V_{cw}$ ) dan harga terkecil pada persamaan ketika retak geser terlentur ( $V_{ci}$ ) berikut ini :

$$V_{ci} = \left( \frac{1}{20} \sqrt{f'_c} \times b_w \times d_p \right) + V_d + \frac{V_i}{M_{maks}} (M_{cr}) \dots (\text{Sumber: 021/BM/2011})$$

$$V_{cw} = [0,3 (\sqrt{f'_c} + f_{pc})] \times b_w \times d_p + V_p \dots (\text{Sumber: 021/BM/2011})$$

Sedangkan jarak antar sengkang :

$$s = \frac{A_v f_y d}{\left( \frac{V_u}{\phi} \right) - V_c} = \frac{A_v \phi f_y d}{V_u - \phi V_c} \dots (\text{Sumber: Nawy, 2001})$$

Dimana :

- $f'_c$  = kuat tekan beton
- $b_w$  = lebar badan (web)
- $d_p$  = jarak dari serat terluar ke titik berat tulangan prategang
- $V_d$  = gaya geser pada penampang akibat beban mati
- $V_i$  = gaya geser terfaktor pada penampang akibat beban luar
- $M_{maks}$  = momen maksimum terfaktor pada penampang yang

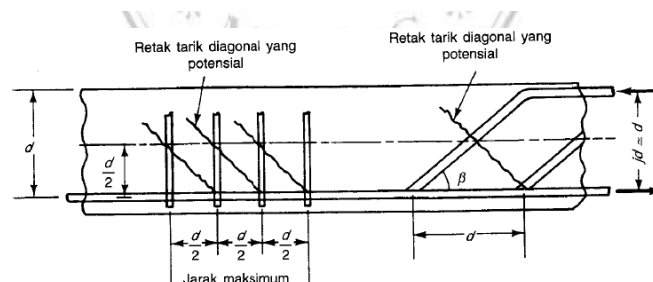
ditinjau

- $M_{cr}$  = momen akibat beban luar yang menyebabkan retak lentur
- $A_v$  = luas satu sengkang
- $f_{pc}$  = tegangan tekan rata-rata pada beton akibat gaya prategang efektif
- $V_p$  = komponen vertikal dari gaya prategang
- $d$  = jarak dari serat ekstrim ke pusat berat penulangan nonprategang
- $f_y$  = kuat leleh baja
- $s$  = jarak antar sengkang
- $V_s$  = tahanan geser nominal baja

Pembatasan jarak maksimum antar sengkang vertikal harus ditetapkan sebagai berikut:

- (a)  $s_{max} \leq 3/4 h \leq 24 \text{ in}$ , dimana  $h$  adalah tinggi total penampang
- (b) Jika  $V_s > 4\lambda\sqrt{f'c'} b_w d_p$ , jarak maksimum di (a) harus dibagi dua
- (c) Jika  $V_s > 8\lambda\sqrt{f'c'} b_w d_p$ , perbesar penampang
- (d) Jika  $V_u = \phi V_n > 1/2\phi V_c$ , luas minimum tulangan geser harus

digunakan dengan rumus :  $A_v = \frac{50 b_w s}{f_y}$



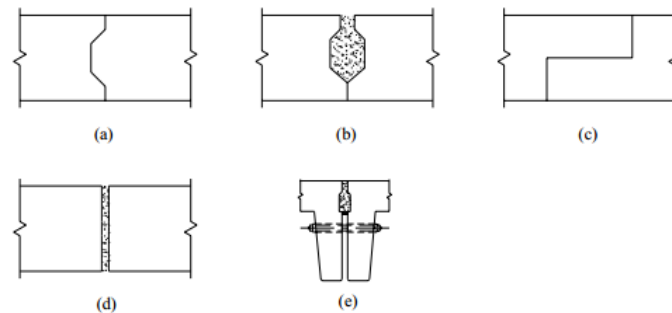
Gambar 2.25 – Jarak Tulangan Badan

(Sumber: Nawy, 2001)

## 2.8 Sambungan Antar Segmen (Shear Key)

Rentan terjadi geser antar titik sambung (joint) pada *box girder* yang dipasang secara segmental. Dalam mencegah terjadinya geser tersebut maka perlu didesain kunci antar segmen. Sambungan basah (wet joint) maupun

menggunakan tipikal sambungan kering (dry joint) merupakan pengunci geser antar segmen (shear key). Dimana pada sambungan basah ditambah bahan perekat (lem).



**Gambar 2.26** – Jenis Konfigurasi *Shear Key* (a) Male-Female (b) Female-Female (c) Dapped (d) Flat (e) Mechanical

(Sumber : Sean R. Sullivan, 2003)

## 2.9 Lendutan Jembatan

Pada prategang akan berdefleksi arah atas yang terjadi akibat adanya beban luar yang bekerja masih kecil dan eksentrisitas kabel prategang ketika transfer. Sebaliknya, pada balok prategang akan berdefleksi arah bawah ketika beban luar yang bekerja penuh. Nilai lendutan dalam batang prategang bisa diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut :

- Lendutan camber akibat prategang :

$$a = -\frac{5PeL^2}{48EI} \quad \text{.....(Sumber: 021/BM/2011)}$$

- Lendutan akibat beban mati dan hidup merata :

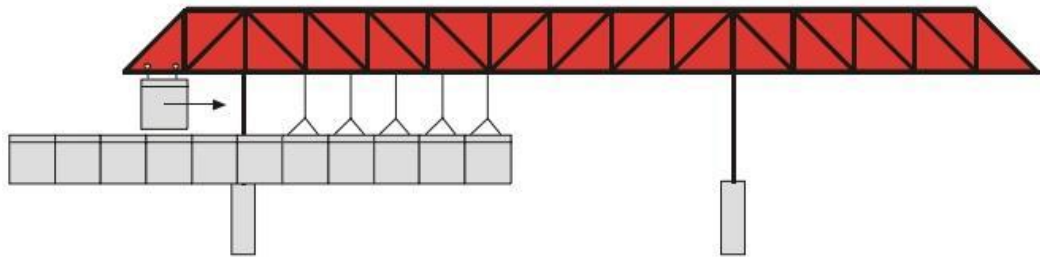
$$\Delta = \frac{5qL^4}{384EI} \quad \text{.....(Sumber: 021/BM/2011)}$$

## 2.10 Metode Konstruksi

### 2.10.1 Prinsip Konstruksi

Dalam sistem penarikan bagian tendon akan dilakukan beberapa bagian dilakukan menggunakan alat yaitu *lauching gantry crane* sesuai dengan klasifikasi kemudian metode merakit dengan cara meletakan beberapa bagian secara bergantian dengan selanjutnya akan disamakan

elevasi pada *box girder multicell* dengan tinggi rencana. Selanjutnya segmen-segmen pada jembatan telah berada dengan posisi dan distressing.



**Gambar 2.27** – Metode Konstruksi *Box girder Segmental*

(Sumber : Jurnal Prof. Dr.-Ing. G. Rombach, 2002)

### 2.10.2 Pemasangan Kabel Prategang

Pada pemasangan kabel prategang akan dilakukan dengan manual memposisikan *box girder multicell* ketinggian yang telah ditentukan setelah seluruh bagian jembatan dipasang, ketinggian bagian segmen disamakan, posisi shear key disesuaikan. Selanjutnya, pada ketinggian yang sama akan dirapatkan dan *distressing* segmen-segmen berada dalam posisinya.

### 2.10.3 Pemasangan Kabel Prategang

Pemasangan kabel strand/kabel prategang akan dikerjakan sebelum stressing. Secara bergantian akan dilakukan penarikan dengan dongkrak dilakukan dalam sisi *abutmen* jembatan pada sesuai dengan letak angkur hidup dari perhitungan sesuai dengan gaya jacking ( $P_j$ ).

### 2.10.4 Pekerjaan Grouting

Selubung kabel (duct) dibersihkan terlebih dahulu sebelum melaksanakan pekerjaan *grouting* dengan mengalirkan air bersih melalui lubang *inlet*. Bertujuan dalam memastikan tidak terjadi sumbatan dalam lubang dalam dan luar. Semen portland dan air adalah material dalam grouting yang digunakan sesuai ketentuan atau yang disesuaikan dengan kebutuhan teknisnya. Dalam menghasilkan distribusi bahan yang seragam dan merata maka material grouting wajib dilakukan pengadukan didalam

alat sehingga mampu untuk beragitasi serta mencampur terus menerus. Selanjutnya, adukan dipompa melalui lubang *inlet* serta dilewatkan melalui saringan.

## 2.11 Pembebanan Jembatan

Berdasarkan peraturan pembebanan jembatan SNI-1725-2016 beban-beban yang bekerja pada jembatan antara lain:

### 1. Aksi dan beban tetap

Elemen-elemen non-struktural dan masing-masing bagian struktural merupakan bagian dari beban mati jembatan. Ketika akan menerapkan factor pada beban biasa serta yang terkurangi menganggap sebagai aksi mengintegrasikan masing-masing berat elemen ini. Kebijakan di dalam menentukan elemen-elemen tersebut perlu digunakan oleh perencana jembatan. Beban tetap dan aksi meliputi:

#### a. Berat sendiri

Faktor berdasarkan materialnya dapat dilihat pada SNI 1725-2016 tabel 3.

#### b. Beban mati tambahan

Berdasarkan SNI 1725-2016 tabel 4

#### c. Pengaruh penyusutan dan rangka

Berdasarkan SNI 1725-2016 tabel 21

#### d. Pengaruh prategang

Berdasarkan SNI 1725-2016 tabel 22.

### 2. Beban lalu lintas

Pada beban lalu lintas dalam perencanaan pada jembatan terdiri atas beban truk "T" serta beban lajur "D". Beban lajur "D" dibuat dalam suatu iring-iringan simulasi kendaraan akan terjadi sebenarnya menimbulkan pengaruh ekuivalen dan bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan. Sedangkan kondisi beban lalu lintas rencana yaitu satu kendaraan berat dengan tiga as merupakan pengertian dari beban truk "T".



a. Beban lajur “D”

Terdiri dari beban garis (BGT) dan beban terbagi rata (BTR). Nilai  $q$  bergantung dengan bentang total dibebani ( $L$ ) dalam beban terbagi rata (BTR) yang dengan intensitas  $q$  kPa sebagai berikut: (Berdasarkan SNI 1725-2016)

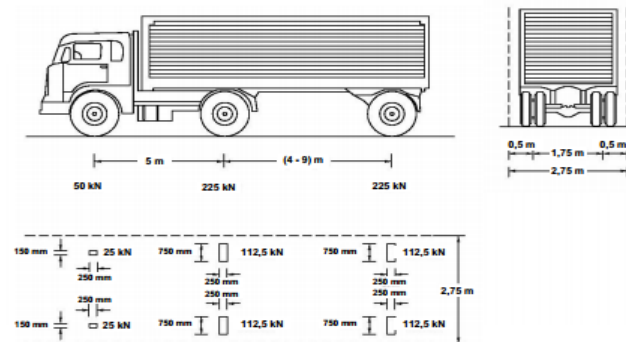
$$L \leq 30 \text{ m}, q = 9.0 \text{ kPa}$$

$$L > 30 \text{ m}, q = 9.0 \times (0.5 + 15L) \text{ kPa}$$

Beban garis (BGT) tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan dengan intensitas  $p$  kN/m harus ditempatkan. Besarnya intensitas  $p = 49.0 \text{ kN/m}$

b. Beban Truk “T”

Pada pembebanan truk “T” meliputi pada truk semitrailer dengan klasifikasi susunan serta massa as dan perhitungan besar beban truk “T” didasarkan pada SNI-1725-2016.



**Gambar 2.28** - Pembebanan truk “T” (500 kN)

3. Gaya Rem (SNI-1725-2016)

Pada perhitungan gaya rem diambil nilai terbesar dari :

- 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata BTR, atau
- 25% dari berat gandar truk desain

Gaya rem berisi lalu lintas dalam arah yang sama dan sesuai dengan pasal 8.2 yaitu diletakan pada semua lajur rencana. Gaya ini harus dipilih yang paling menentukan pada masing-masing arah longitudinal dengan

asumsi diatas permukaan jalan pada jarak 1800 mm. Ketika menghitung besarnya gaya rem maka seluruh lajur perencana wajib mendapat beban dengan simultan karena dimasa depan jembatan akan menjadi satu arah beberapa lajur. Perhitungan gaya rem berlaku pada Pasal 8.4.3 yaitu faktor kepadatan lajur yang ditentukan.

#### 4. Gaya Sentrifugal (SNI 1725-2016)

Beban hidup haruslah digunakan sebagai hasil perkalian dengan berat ganda truk yang direncanakan dengan faktor  $C$  dan efek guling dalam beban roda untuk tujuan menghitung radial, pengaruh gaya sentrifugal sebagai berikut:

$$C = f \frac{v^2}{gR_l}$$

##### Keterangan :

$v$  = kecepatan rencana jalan raya (m/detik)

$f$  = faktor dengan nilai  $4/3$  untuk kombinasi beban selain keadaan batas fatik dan  $1,0$  untuk keadaan batas fatik

$g$  = percepatan gravitasi:  $9.8$  (m/detik<sup>2</sup>)

$R_l$  = jari-jari kelengkungan lajur lalu lintas (m)

Perencanaan Geometrik Jalan Bina Marga sebagai pedoman telah ditentukan diambil tidak kurang dari nilai untuk kecepatan rencana jalan raya. Pada jarak ketinggian 1800 mm diatas permukaan jalan diberlakukan secara horizontal dalam gaya sentrifugal. Sehingga, gaya sentrifugal pada permukaan jembatan untuk diteruskan ke struktur bawah direncanakan mekanismenya oleh perencana. Akibat beban roda dapat dipertimbangkan dalam perencanaan karena mempengaruhi superelevasi sehingga mengurangi pada momen guling akibat dari gaya sentrifugal.

#### 5. Aksi lingkungan

##### a. Beban angin

- Beban dari struktur atas

Jika angin bekerja tidak tegak lurus struktur maka tekanan angin dasar PB pada berbagai sudut serang haruslah dilaksanakan dalam titik berat pada area beban angin serta dapat diambil seperti yang ditentukan dalam Tabel 30. Pada arah sudut serang dapat digunakan tegak lurus dengan arah longitudinal. Pengaruh arah angin terburuk dalam komponen jembatan ditinjau untuk perencanaan harus yang menghasilkan. Tekanan angin memanjang dan melintang haruslah digunakan dengan bersamaan didalam perencanaan.

Sudut serang	Rangka, kolom, dan pelengkung		Gelagar	
	Beban lateral MPa	Beban longitudinal MPa	Beban lateral MPa	Beban longitudinal MPa
0	0,0036	0,0000	0,0024	0,0000
15	0,0034	0,0006	0,0021	0,0003
30	0,0031	0,0013	0,0020	0,0006
45	0,0023	0,0020	0,0016	0,0008
60	0,0011	0,0024	0,0008	0,0009

**Tabel 2.5-** Tekanan angin dasar (*PB*) untuk berbagai sudut serang

